

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.05.017

海相碳酸盐岩自然伽马能谱测井资料的沉积学意义

——以川东南L1井下寒武统清虚洞组为例

冯伟明^{1,2}, 谢渊^{1,2}, 刘建清^{1,2}, 林家善^{1,2}, 陈果³, 赵瞻^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都 610081;
3. 中石油川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院, 成都 610051)

摘要:层序界面和最大海泛面在Th、K和U曲线上明显偏移,利用Th/U及Th/K曲线的旋回性可进一步详细划分层序地层。Th/U比值与氧化-还原条件和古水深存在良好的相关性,Th/U比值减小代表还原性增强、水体加深。Th/K比值是反映沉积物是否处于暴露环境的重要指示参数。黏土矿物图版可定性分析黏土矿物类型及其含量变化,不同的黏土矿物组合代表不同的古气候。利用L1井自然伽马能谱测井曲线和图版的变化特征可以恢复清虚洞期古沉积环境的演变,由sq1期到sq4期,水体逐渐变浅,氧化性具增强趋势,干旱性基本稳定,沉积相由潮下低能逐渐演变为潮上蒸发坪。

关键词:自然伽马能谱测井; 沉积环境; 沉积旋回; 碳酸盐岩; 清虚洞组

中图分类号:P631.8 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2016)05-0165-08

测井资料作为沉积学和层序地层学研究的重要资料之一,特别在沉积盆地覆盖区,地震资料纵向分辨率低,岩心有限且不连续,应用数据连续、纵向分辨率高的测井资料进行沉积相分析和层序地层划分就显得尤其关键。在自然伽马测井(GR)的基础上发展起来的自然伽马能谱测井(NGS)不仅可以反映总的伽马放射性强度,还可以定量测试元素铀(U)、钍(Th)、钾(K)的含量,它可以解决一些其他测井曲线所不能解决的地质问题,尤其在沉积学古环境和古气候的恢复方面日益受到学者的关注^[1-5]。近年来,在川中磨溪构造上的寒武系龙王庙组(相当于清虚洞组)地层中已获得工业天然气流^[6],之前对于四川盆地清虚洞组勘探和研究程度均较低,川东南地区钻遇清虚洞组地层的钻井均无取心,本文以川东南L1井清虚洞组为研究对象,分析其自然伽马能谱测井资料的沉积学意义。

1 清虚洞组地层概况

四川盆地东南部下寒武统清虚洞组厚 160~

700 m,平均 200 m 左右,主要由海相灰岩、白云岩组成,座3井、临7井一带地层厚度显著增加,发育一套厚度较大的膏岩、盐岩^[6-8]。清虚洞组底部与下伏沧浪铺组碎屑岩为整合接触,顶部与上覆的高台组泥质白云岩也呈整合接触关系,均以岩性突变面作为识别标志^[6-8]。清虚洞组的古生物化石相对较少,仅有三叶虫;普遍发育水平层理、泥裂、波痕、膏盐假晶等沉积构造^[6-7]。

L1井地理上位于四川盆地东南缘,构造上处于川东南坳褶带内^[7]。L1井在清虚洞组未取心,根据钻井岩屑观察和常规测井解释综合分析:清虚洞组厚 179 m,其中,下部岩性以灰色中一厚层灰质白云岩为主,夹少量含黄铁矿膏质白云岩;中上部发育薄一中层白云岩,夹含泥质白云岩、藻纹层白云质灰岩;顶部为薄层含泥质膏质白云岩及膏质白云质。

2 Th、K 和 U 曲线与层序地层

2.1 层序界面

地层存在旋回式的波动沉积,垂向上表现为沉积旋回的叠加,测井曲线很好地记录了这种沉积的旋回性特征^[9-11]。自然伽马能谱测井对于碳酸盐岩地层岩性信息敏感,自然伽马能谱测井曲线突变主要指示地层不整合面和岩性突变面,因此,曲线上的响应特征为层序界面的识别提供了依据,根据纵向上突变点可以识别不同级次的旋回界面^[10-15]。清虚

基金项目:中国地质调查局攻关项目(1212010782003);中国地质调查局陆域能源调查计划项目(12120115004101);国土资源部成都地质矿产研究所所控青年基金[所基控]2014-02)

作者简介:冯伟明(1986—),男,工程师,从事沉积地质和石油地质调查与研究, E-mail: fengweiming009@163.com

通讯作者:赵瞻(1982—),男,工程师,从事油气地质调查与研究, E-mail: 13859000@qq.com

收稿日期:2015-09-23; **改回日期:**2016-01-05. 蔡秋蓉编辑

洞组碳酸盐岩与下伏的沧浪铺组滨岸相泥岩地层, 以及与上覆的高台组混积陆棚相细粒碎屑岩地层, 在地层界线附近(2 146 和 1 967 m)U、K 和 Th 曲线明显偏移(图 1)。清虚洞组相当于层序地层学中的一个基本层序, 清虚洞组的底界和顶界都对应于基本层序的层序界面(SB), 该层序底界和顶界的类型都属于岩性岩相转换面, 代表了海平面以及沉积相的较大变化。

2.2 最大海泛面

铀含量与有机碳含量存在着对应关系, 有机碳的含量受水深的控制, 因此, 铀被作为古环境的指示参数^[1-5]。U 曲线在 2 085.5 m 处表现为低值背景下的跳波现象, 综合录井岩屑和测井曲线解释岩性为薄层泥灰岩, 与海泛面特征吻合, 推测该界面为该

层序内最大海泛面(MFS)。铀元素容易随着流体迁移, 裂缝或孔隙中含有放射性的流体时, 常表现为高 U 值。综合 L1 井钻井资料分析, 该层序顶部(1 996~1 979 m)U 高值与裂缝中流体有关(图 1), 原始的沉积岩 U 值被裂缝流体放射性干扰^[16], 因此, 该段 U 曲线变化不能指示古水深的变化。

沉积岩中的钾含量主要与黏土和钾岩含量呈正相关关系^[17-19]。L1 井的 K 曲线受到后期构造裂缝流体影响很小, K 值对于海平面的变化较灵敏。最大海泛面常对应着富含泥质的沉积物, 因此, 最大海泛面一般在 K 曲线变缓为高值, K 曲线在层序内最大海泛面附近表现为明显的突变(图 1)。

从图 1 来看, L1 井的 Th 曲线对于碎屑岩中泥质含量的变化较敏感, 但对于碳酸盐岩的泥质含量变化指示相对不灵敏。本文主要利用 U 曲线和 K

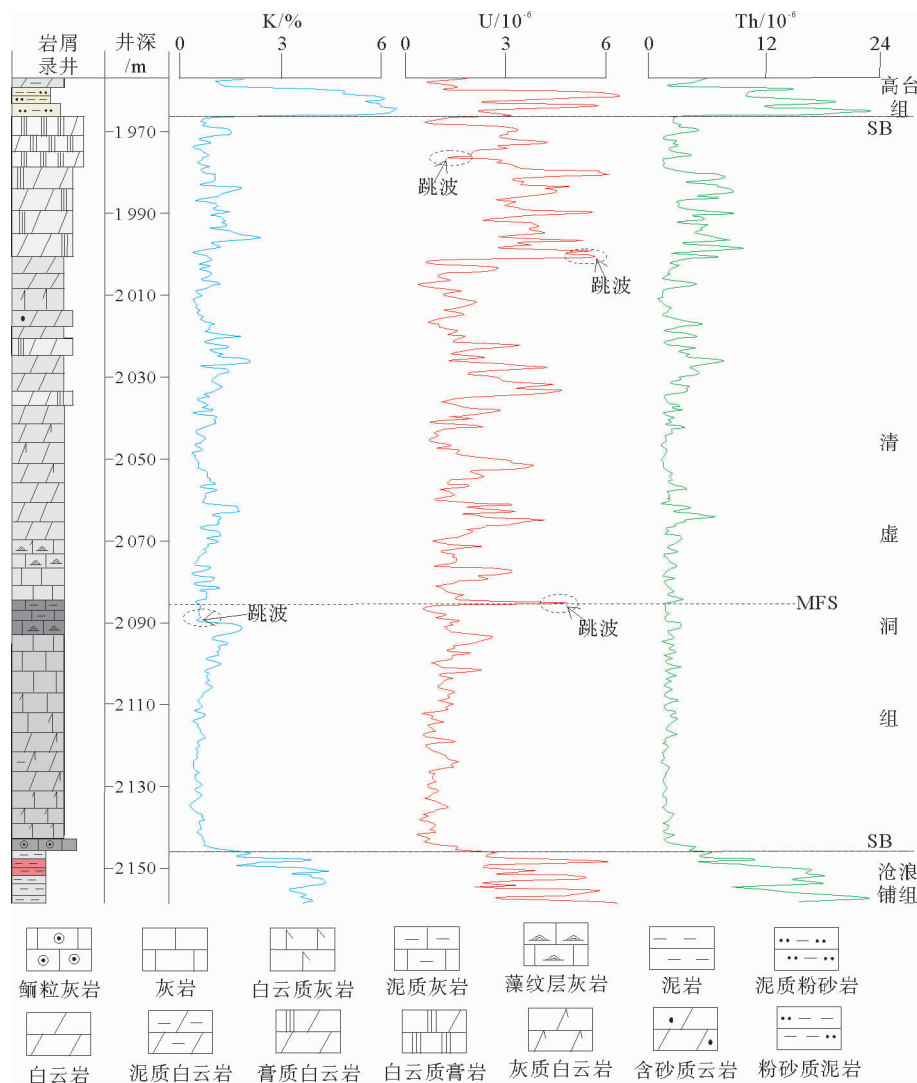


图 1 L1 井自然伽马能谱测井曲线的变化特征

Fig. 1 The characteristics of natural gamma log of the well L1

曲线识别海相碳酸盐岩中的最大海泛面,与岩屑录井资料吻合。

3 Th/U 和 Th/K 曲线的沉积学应用

3.1 Th/U 和 Th/K 比值的沉积学意义

Th/U 比值可以指示古环境的氧化或还原程度和相对古水深的变化。在氧化状态下,随着岩石中铀元素的减少,Th/U 值会增大;在还原状态下,随着岩石中铀元素的富集,Th/U 值会减小^[2-5,11]。

Th/K 比值变化也能够估计沉积物沉积水体深浅的变化。Th/K 高值代表沉积时经历了风化暴露,长时间暴露的沉积物的 Th/K 值常大于 7;Th/K 低值则指示深水低能环境^[11,19]。

3.2 层序地层划分

综合区域地质特征分析,在利用 Th、K 和 U 曲线识别清虚洞组的顶底界面以及最大海泛面的基础之上,根据 Th/U 和 Th/K 曲线的包络线在纵向上变化趋势,准层序组的界面对应于高 Th/U 值折向低 Th/U 值以及高 Th/K 值折向低 Th/K 值的拐点位置,将清虚洞组划分为 1 个基本层序(SQ)和 4 个准层序组(sq)即:①sq1 段(2 146~2 111.5 m)、②sq2 段(2 111.5~2 064 m)、③sq3 段(2 064~2 025 m)、④sq4 段(2 025~1 967 m)。低 Th/U 及低 Th/K 比值对应于层序内的海泛面,其中该层序内最小的 Th/U 值和 Th/K 值对应于该层序的最大海泛面(MFS),位于 2 085.5 m 处(图 2)。在每个准层序组内又可细分为海侵体系域(TST)和高位体系域(HST),从底到顶,准层序组的 TST 的厚度逐渐减小,HST 的厚度逐渐增大,表明该层序整体上为一个逐渐变浅的沉积序列。通过 U、K 和 Th 曲线以及 Th/U、Th/K 曲线的层序地层划分,与岩屑录井资料的层序地层划分结果基本吻合。

3.3 Th/U 和 Th/K 曲线的沉积学意义

根据层序内的 Th/U 和 Th/K 曲线的变化特征,总体上来看,沉积水介质的氧化-还原条件和古水深处于不断变化中,且具有旋回性。

sq1 的 Th/U 值大部分在 1.0~3.0 之间,Th/U 曲线向上具有明显的旋回性,从底向上先减小再增大,且变化幅度小(图 2),说明沉积水介质具有较强还原性。

sq2 的 Th/K 曲线旋回性明显,最大海泛面

(MFS)附近 Th/K 值约为 2.0;Th/U 曲线变化不明显但比值大部分都小于 2.0,表明 sq2 旋回 TST 期为深水低能强还原条件的环境,特别是在最大海泛期古水深和还原性达到最大,Th/K 和 Th/U 值均变为最小(图 2)。

sq3 的 Th/U 曲线也具有一定的旋回性,Th/K 值基本都大于 3.0,表明 sq3 的古水深与 sq2 相比有所减小(图 2)。

由于 U 值受裂缝影响,sq4 的 Th/U 比值不可靠,但 sq4 的 Th/K 曲线变化规律明显,sq4 海侵域(TST)的 Th/K 值均小于 7.0,但 sq4 高位域(HST)的 Th/K 值具明显震荡增大特征,部分 Th/K 比值显著大于 7.0(图 2),表明 sq4 旋回 HST 期水体较动荡,古水深显著降低,具有接近于暴露地表的特征。

4 黏土矿物图版的沉积学意义

地层中的黏土矿物的生成和分布与古气候关系紧密,因此,可以通过黏土矿物的成分和含量的变化反演古环境的演变^[20-21]。前人研究表明,伊利石以及伊利石+绿泥石组合、伊利石+伊-蒙有序间层+绿泥石组合、伊利石+蒙脱石组合,代表干旱-半干旱古气候和富含盐的偏碱性水介质;高岭石则在潮湿气候和酸性水介质中大量形成^[21-22]。

对 L1 井清虚洞组 1 400 多个钍、钾数据点每隔 0.5 m 进行采样,投点在斯伦贝谢公司的黏土矿物分析图版上,定性判断其黏土矿物类型和含量^[21]。从图 3 对比分析清虚洞组的黏土矿物分布得出:清虚洞组地层中的黏土矿物主要以伊利石为主、蒙脱石次之,表明整个清虚洞期的古气候以半干旱-干旱为主,蒸发作用较强,沉积水体为偏碱性水介质。sq1 旋回的 Th、K 值较集中(图 3A),表明在该小尺度周期内古气候基本稳定、古气候波动幅度很小;sq2 和 sq3 旋回的 Th、K 值较为发散(图 3B、C),表明古气候波动幅度有所增大;sq4 旋回高位体系域(TST)的 Th、K 值均明显向高值方向扩散,表明在该小尺度周期内古气候波动幅度继续增大(图 3D)。

另外,碳酸盐岩中的高岭石大都是在近地表大气水环境中沉淀形成的,表生岩溶环境中往往有不同数量的高岭石分布,因此,高岭石的存在是判断碳酸盐岩表生岩溶成岩环境的重要依据之一^[20]。准层序组 sq4 高位体系(HST)的少量投点接近黏土矿物图版的高岭石区域(图 3D),表明 L1 井 sq4 HST 期虽然未发生古暴露,但根据投点的位置

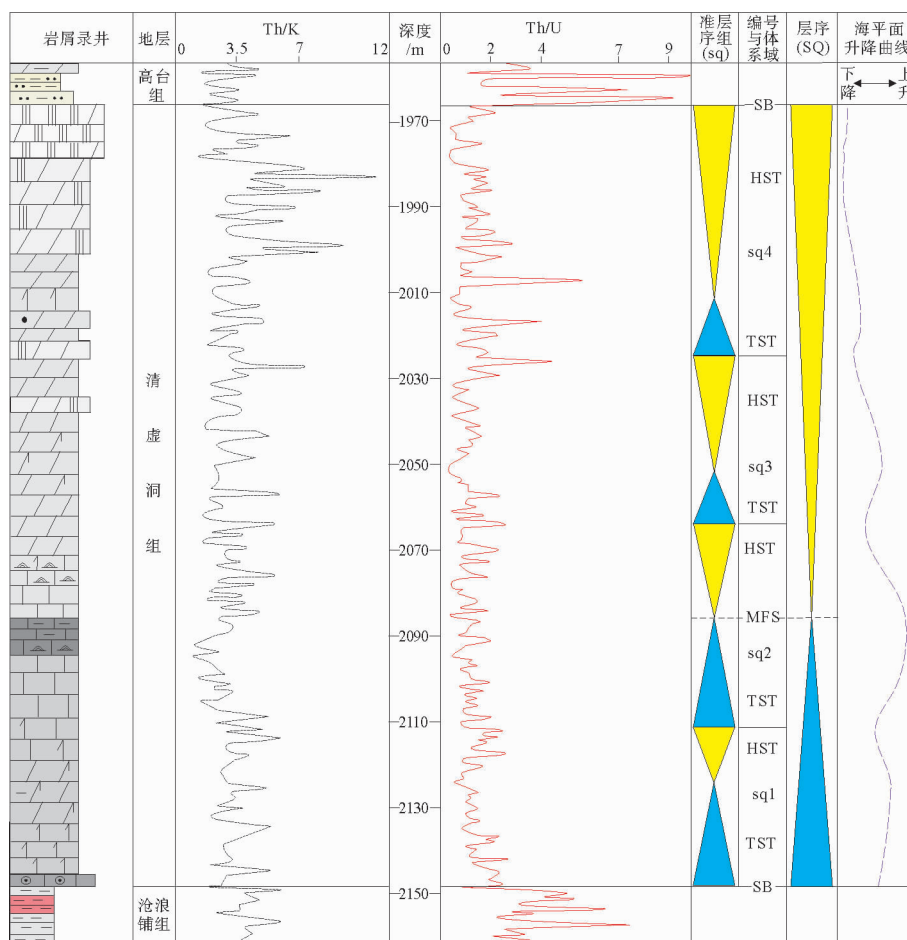


图2 Th/K 和 Th/U 比值及沉积旋回划分(L1井)(岩性符号与图1相同)

Fig. 2 Th/K and Th/U ratios and depositional cycles of well L1

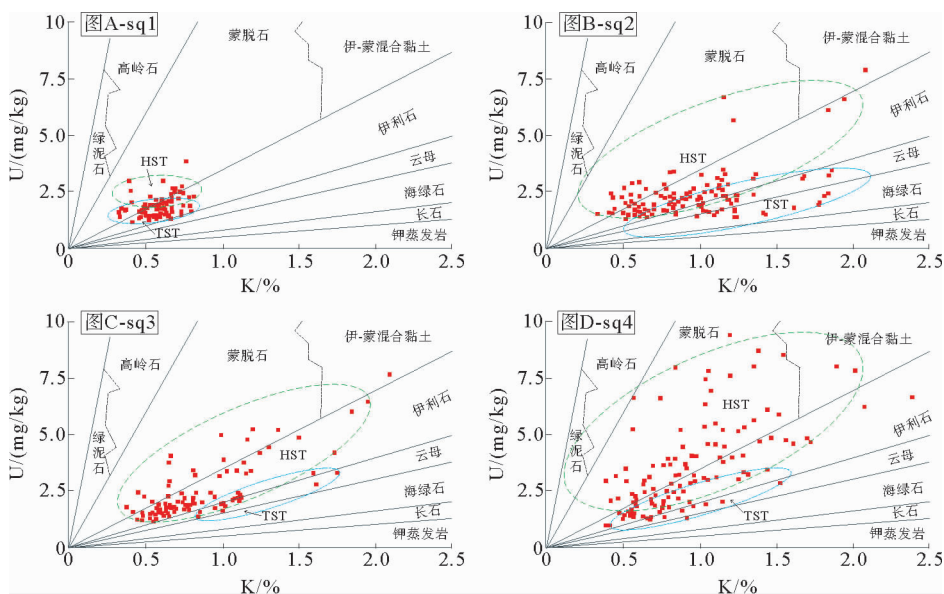


图3 清虚洞组 sq1—sq4 黏土矿物的变化特征(L1井)

Fig. 3 The characteristics of clay mineralogy of sq1—sq4 in Qingxudong Formation in well L1

判断 sq4 HST 期部分时间水体明显变浅,当时沉积物接近于暴露地表。清虚洞组沉积末期的区域性海退导致鄂西地区经历了较长时间陆上暴露,古喀斯特岩溶角砾岩和雪花状白云岩是其岩石学响应特征^[23],而 L1 井清虚洞组顶部少量投点在黏土矿物图版上接近于高岭石识别区(图 3D),是该次区域性海退导致川东南 L1 井沉积水体变浅的测井响应特征。

5 沉积环境演变

自然伽马能谱测井实质上是一种地球化学测井方法,通过对岩石的 U、Th、K 含量的连续测量,获得连续的 U、Th、K 测量值,进而衍生出 Th/U 和 Th/K 曲线以及黏土矿物图版,这些大量间接的地球化学数据都可以用于沉积环境演变的恢复。当然,仅根据“一孔之见”的自然伽马能谱测井资料来分析海相碳酸盐岩沉积环境的演变存在一定的局限性,因此,以区域地质、地球物理以及古生物等资料基础之上的沉积环境恢复准确度才更高^[24]。

L1 井清虚洞组整体上呈低 Th、低 K 特征,反映清虚洞期 L1 井远离陆源区,距离咸化潟湖中心也比较远,以台地内清水碳酸盐沉积为主。区域地质和地震勘探资料表明,清虚洞组沉积期扬子板块的古陆位于现今的川西康定-滇北楚雄一带^[6-8];而膏岩、盐岩广泛沉积的咸化潟湖中心则位于川南临 7 井一带^[6,25-26],因此,自然伽马能谱资料的沉积相分析结果也得到其他地质和地球物理资料的印证。

前人的研究资料表明,川东南地区清虚洞组下部灰岩较多,发育结晶灰岩、白云质灰岩、颗粒灰岩和泥质灰岩,古生物以三叶虫为主,常见水平层理、斜层理和波痕等沉积标志;清虚洞组上部白云岩及膏岩、盐岩明显增多,发育碳酸盐岩与膏岩、盐岩互层或碳酸盐岩与膏质白云岩互层,古生物化石极少,常见泥裂和膏盐假晶等极浅水干旱沉积标志,因此,清虚洞组沉积期整体上表现为一次由西向东的区域性海退和海水咸化过程^[6-8,25]。

在综合分析邻区大量野外露头、钻井岩心、岩屑资料和常规测井资料的基础之上,根据自然伽马能谱测井的 Th/U 和 Th/K 曲线及黏土矿物图版恢复沉积环境演变。从 sq1 期到 sq4 期,古水深总体上具变浅趋势(图 2),水体还原性逐渐减弱、氧化性增强,气候干旱性基本稳定,沉积相由潮下低能逐渐演变为潮上蒸发坪。sq1 期至 sq2 旋回 TST 期古水深较大,水体安静,还原性较强,主要为潮下低能沉积;sq2 旋回 HST 期至 sq3 期古水深略有变浅趋势,水体动荡性略有增强,水体主要为弱还原性,沉积相为潮下低能-潮间带;sq4 期古水深持续变浅,水体呈弱还原-弱氧化性,海平面升降频繁,水体动荡程度增强,Th/K 比值指示沉积物具有接近于暴露地表的特征,主要为潮间带-潮上蒸发坪沉积(表 1)。

综合上述多种地质和地球物理资料分析清虚洞期沉积环境演变,结果表明该期古气候变化幅度不大,地层由深到浅,岩性的变化主要受沉积相演变的控制,而沉积相的演变主要受控于该处古水深的变化(表 1),即区域海平面的升降变化。

表 1 L1 井清虚洞组不同层段古沉积环境

Table 1 Result of sedimentary environment in different members of Qingxudong formation in well L1

井深/m	层序地层	沉积相	氧化-还原条件	古水深	水体动荡程度	古气候
2 025~1 967 m	sq4	潮间带-潮上蒸发坪	弱还原-弱氧化	很浅	中等	半干旱-干旱,波动幅度较大
2 085.5~2 025 m	sq2 HST—sq3	潮下低能-潮间带	弱还原	较浅	中等	半干旱-干旱,波动幅度较小
2 146~2 085.5 m	sq1—sq2 TST	潮下低能	中等还原	较深	弱	半干旱,波动幅度很小

6 结论

(1)层序界面以及最大海泛面在 Th、K、U 曲线上明显偏移,根据 Th/U 和 Th/K 曲线的旋回性可进一步详细地划分层序地层。Th/U 可以反映氧化-还原条件的变化,Th/K 也能够估计沉积物古水

体深浅的变化。黏土矿物图版定性分析黏土矿物类型及其含量,不同的黏土矿物组合代表了不同的古气候。

(2)根据 L1 井自然伽马能谱测井曲线变化特征,将清虚洞组划分为 4 个准层序组。由 sq1 到 sq4 期,水体逐渐变浅,氧化性增强,古气候干旱性基本稳定,沉积相由潮下低能逐渐演变为潮上蒸发坪,岩

性变化主要受海平面升降的控制。

(3)自然伽马能谱测井是一种地球化学测井方法,U、Th、K曲线以及衍生出Th/U、Th/K曲线和黏土矿物图版,都可以作为海相碳酸盐岩沉积学分析的重要方法。

自然伽马能谱测井是“一孔之见”,也是一种重要的、间接的地质分析手段,因此,在应用自然伽马能谱测井资料进行沉积学分析时,须结合其他精确度更高的地质资料,才能大幅增加自然伽马能谱测井资料的沉积学分析可靠性。

致谢:本文在资料收集与处理过程中得到西南石油大学彭军教授、王亮讲师和中石化勘探南方分公司研究院魏志红高工的大力帮助,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 陈中红,查明.铀曲线在沉积盆地古环境反演中的应用[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):11-14. [CHEN Zhonghong, ZHA Ming. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6):11-14.]
- [2] 陈中红,查明,金强.自然伽马及自然伽马能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J].地球物理学报,2004,47(6):1145-1149. [CHEN Zhonghong, ZHA Ming, JIN Qiang. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1145- 1149.]
- [3] 刘泽纯,陈晔,袁林旺,等.应用自然伽马测井曲线反演 2.85 MaBP 古气候变化[J].中国科学(D辑),2000,30(6):609-618. [LIU Zechun, CHEN Ye, YUAN Linwang, et al. The application of natural Gamma logging curve to recovering palaeoclimatic changes from 2.85 MaBP[J]. Science in China (Series D), 2000, 30(6):609-618.]
- [4] 柴细元,李丽荣,刘志云.自然伽马能谱测井资料在张东地区的应用[J].测井技术,2000,24(2):118-124. [CHAI Xiyuan, LI Lirong, LIU Zhiyun. On application of natural gamma ray spectrometry log data in Zhang dong area[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(2):118-124.]
- [5] 王学军,王志欣,刘显阳,等.利用铀的测井响应恢复鄂尔多斯盆地古水深[J].天然气工业,2008,28(7):46-48. [WANG Xuejun, WANG Zhixin, LIU Xianyan, et al. Restoring palaeo-depth of the Ordos basin by using Uranium response from GR logging [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7):46-48.]
- [6] 冯伟明,谢渊,刘建清,等.上扬子下寒武统龙王庙组沉积模式与油气勘探方向[J].地质科技情报,2014,33(3):106-111. [FENG Weiming, XIE Yuan, LIU Jianqing, et al. Sedimentary model and hydrocarbon exploration targets of the lower cambrian longwangmiao formation in the upper yangtze area [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(3):106-111.]
- [7] 刘建锋,彭军,魏志红,等.川东南清虚洞组沉积特征及其对储层的控制[J].地学前缘,2012,19(4):239-246. [LIU Jianfeng, PENG Jun, WEI Zhihong, et al. Sedimentary features of Qingxudong formation in southeast Sichuan and their control on reservoirs [J]. Earth Science Frontier, 2012, 19(4): 239-246.]
- [8] 李伟,余华琪,邓鸿斌.四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征[J].石油勘探与开发,2012,39(6):681-690. [LI Wei, YU Huaqi, DENG Hongbin. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 681-690.]
- [9] Van Wagoner J C, Mitchum H M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [C]. AAPG Methods in Exploration Series, 1990, 7:1-57.
- [10] 伊海生.测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J].古地学报,2011,13(4):456-466. [YI Haisheng. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4):456-466.]
- [11] Ehrenberg S N, Svåná T A. Use of gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: An example from the Finnmark carbonate platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(2):295-308.
- [12] 李新虎.测井曲线拐点在测井层序地层分析中的应用研究[J].天然气地球科学,2006,17(6):815-819. [LI Xinhui. Sequence stratigraphic analysis with curve inflexion from geophysical logging data [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 815-819.]
- [13] 王卫红,姜在兴,操应长,等.测井曲线识别层序边界的方法探讨[J].西南石油学院学报,2003,25(3):1-4. [WANG Weihong, JIANG Zaixing, CAO Yingchang, et al. Discussion of the methods of using logging curves to recognize sequence boundaries [J]. Journal of Southwest Petrol Euminstitute, 2003, 25(3):1-4.]
- [14] 余杰,陈钢花.测井资料高分辨率层序地层分析[J].测井技术,2007,31(1):21-24. [YU Jie, CHEN Ganghua. High-resolution sequence stratigraphic analysis with logging Data [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1):21-24.]
- [15] 阳孝法,林畅松,杨海军,等.自然伽马能谱在塔中地区晚奥陶世碳酸盐岩层序地层分析中的应用[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):384-391. [YANG Xiaofa, LIN Changsong, Yang Haijun, et al. Application of natural gamma ray spectrometry in analysis of Late Ordovician carbonate sequence stratigraphic analysis in middle Tarim Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3):384-39.]
- [16] 冯伟明,彭军,冯春明,等.川东南清虚洞组储层测井响应特征

- 及其控制因素[J]. 油气地球物理, 2011, 9(3): 61-64. [FENG Weiming, PEN Jun, FENG Chunming, et al. Logging response characteristics and geological influence factors of Qingxudong Formation reservoir in the southeast of Sichuan[J]. Petroleum Geophysics, 2011, 9(3): 61-64.]
- [17] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:236-242. [JIANG Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:236-242.]
- [18] 沈平,朱惠英,徐永昌. 沉积岩中铀、钍、钾分布特征[J]. 沉积学报, 1983, 1(3): 109-122. [SHEN Ping, ZHU Huiying, XU Yongchang. Distributional features of uranium, thorium and potassium in the sedimentary rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1983, 1(3): 109-122.]
- [19] 黄隆基,首祥云,王瑞平. 自然伽马能谱测井原理及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1995:179-194. [HUANG Longji, Shou Xiangyun, Wang Ruiping. The Principle and Application of Natural Gamma Ray Spectrometry Logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995:179-194.]
- [20] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2010: 160-176. [HUANG Sijing. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:160-176.]
- [21] 陈涛,王欢,张祖青,等. 黏土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 416-420. [CHEN Tao, WANG Huan, ZHANG Zuqing, et al. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(4): 416-420.]
- [22] 赵杏媛,张有瑜. 黏土矿物和黏土矿物分析[M]. 北京:海洋出版社, 1990:61-70. [ZHAO Xingyuan, ZHANG Youyu. Clay Minerals and Analysis of Clay Minerals [M]. Beijing, China Ocean Press, 1990:61-70.]
- [23] 王传尚,李旭兵,李志宏,等. 中上扬子区寒武纪层序地层划分与对比[J]. 地层学杂志, 2012, 36(4): 773-783. [WANG Chuanshang, LI Xubing, LI Zhihong et al. Cambrian sequence-stratigraphy in the Middle and Upper Yangtze platform[J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(4): 773-783.]
- [24] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2006: 11-107. [ZHU Xiaomin. Sequence Stratigraphy[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006:11-107.]
- [25] 黄建国. 上扬子区(四川盆地)寒武系的含盐性与地质背景[J]. 岩相古地理, 1993, 13(5): 44-56. [HUANG Jianguo. Saltiness and geologic background of the Cambrian strata in the Sichuan basin in the upper Yangtze area[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1993, 13(5): 44-56.]
- [26] 徐美娥,张荣强,彭勇民,等. 四川盆地东南部中、下寒武统膏岩盖层分布特征及封盖有效性[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 301-306. [XU Mei'e, ZHANG Rongqiang, PENG Yongmin, et al. Distribution and sealing effectiveness of Middle-Lower Cambrian evaporite cap rocks in the southeastern Sichuan basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(3): 301-306.]

**SEDIMENTOLOGICAL SIGNIFICANCE OF NATURAL
GAMMA RAY LOGGING DATA OF MARINE CARBONATE:
A CASE OF THE WELL L1 OF QINGXUDONG FORMATION,
LOWER CAMBRIAN IN SOUTHEAST SICHUAN BASIN**

FENG Weiming^{1,2}, XIE Yuan^{1,2}, LIU Jianqing^{1,2}, LIN Jiashan^{1,2}, CHEN Guo³, ZHAO Zhan^{1,2}

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081;

2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081;

3. CCDC Geological Exploration&-Development Research Institute, Chengdu 610051)

Abstract: Sequence interfaces and the maximum flooding surface are obviously observed in the U, Th, K curves. Therefore, the Th/U and Th/K curves can be applied for detailed subdivision of sequences. Changes in Th/U ratio are well associated with water depth and oxidation-reduction conditions. The low Th/U ratio indicates deepening of water depth and increasing in reducibility. The value of Th/K ratio is also an indicator to the exposure time of sediments in a weathering environment. Using the clay mineral chart, we may qualitatively determine the types of clay minerals and the changes in content. The changes in clay mineral assemblage are usually regarded as the responses to climatic changes. The natural gamma logging curve and the clay mineral chart of the well L1 are applied in this paper to recover the evolution of the sedimentary environment in the Qingxudong period, from sq1 to sq4. It suggests that the water became shallower gradually, the oxidation was increasing, drought remained stable, and the sedimentary facies gradually evolved from a low-energy subtidal zone to supratidal evaporates in this period.

Key words: natural gamma logging; depositional environment; sedimentary cycle; carbonate rocks; Qingxudong Formation